

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES PARA AEROGENERADORES: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN

Castello, Marcelo C.¹, Salerno, Juan J.¹ Marino, Edgardo¹, Chemes, Jorge^{1,3}, Rullo, Pablo G^{1,2}.

¹ Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES - FRRo – UTN).

² Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER – FRSN – UTN).

³ Instituto de Estudios en Ciencia, Tecnología, Cultura y Desarrollo (CITECDE-UNRN)
castello.marcelo@gmail.com

RESUMEN.

Este artículo presenta el diseño integral de un sistema de monitoreo de vibraciones para aerogeneradores de baja potencia. El sistema propuesto incluye los dispositivos de hardware necesarios para el sensado de vibraciones y velocidad, la arquitectura de comunicación para la transmisión de datos, y una aplicación para el análisis y visualización gráfica. El diseño abarca de manera sistemática todos los subsistemas tanto a nivel de hardware como de software. Las etapas de diseño e implementación se llevaron a cabo con éxito, resultando en un sistema de monitoreo que ofrece funcionalidades similares que los sistemas comerciales pero con total disponibilidad de los datos obtenidos. Tanto fabricantes como usuarios de turbinas eólicas de baja potencia enfrentan desafíos en términos de seguridad mecánica, durabilidad y mantenimiento. El monitoreo de vibraciones es crucial para garantizar una operación segura y eficiente. Los costos de los sistemas comerciales de medición, control y seguimiento de turbinas eólicas suelen ser elevados, haciéndolos inaccesibles para las cooperativas energéticas. Este trabajo busca superar estas limitaciones técnico-económicas mediante el desarrollo de soluciones locales, promoviendo así el potencial de la generación eólica de baja potencia a nivel nacional y regional.

Palabras Claves: Energías Renovables, Detección de fallas, Generación Distribuida, Cooperativas eléctricas, Redes inteligentes.

Área Temática: Generación Distribuida.

Categoría del Trabajo: Trabajo de docentes y/o investigadores.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento en la industria de la generación eólica ha llevado al incremento en la instalación de generadores eólicos de baja potencia en diversas ubicaciones, tanto remotas como urbanas, gracias a su capacidad para aprovechar recursos eólicos disponibles. Estos generadores, con potencias inferiores a 10 kW, representan una solución tanto para la electrificación de áreas aisladas como para la inserción en redes eléctricas urbanas, promoviendo la generación de energía distribuida [1]. Sin embargo, tanto los fabricantes como los usuarios enfrentan desafíos comunes en términos de seguridad mecánica, durabilidad y mantenimiento de estos sistemas. Entre estos desafíos, el monitoreo de vibraciones emerge como una preocupación esencial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de las turbinas eólicas [2]. La evaluación de la condición vibratoria de la máquina durante su operación puede proporcionar información valiosa para desarrollar protocolos de protección y mantenimiento, previniendo posibles fallas [3].

En Argentina, este tipo de turbinas de baja potencia han sido instaladas principalmente por cooperativas de energía en áreas urbanas o periurbanas. Siendo estas experiencias las pioneras en el desarrollo de la generación distribuida en el país [4]. Muchas de esas experiencias de inserción de generación eólica de baja potencia por parte de cooperativas de energía se encuentran actualmente fuera de servicio por fallas mecánicas producto de dificultades de mantenimiento. Este tipo de problemas podrían ser abordados a partir de sistemas de monitoreo. Sin embargo, los costos de los sistemas de medición, control y monitoreo presentes en el mercado suelen ser desproporcionados respecto del precio de una turbina de baja potencia, y particularmente inaccesibles a cooperativas de energía. Salvar algunas de estas limitaciones técnico-económicas con desarrollos locales posibilitarían desplegar el potencial de la generación eólica de baja potencia a nivel nacional y regional [5,6].

En este trabajo se propone el diseño experimental de un sistema de monitoreo de vibraciones para turbinas eólicas de baja potencia. El mismo consta de los dispositivos de hardware necesarios para el sensado de vibraciones y velocidad, la arquitectura de comunicación para la transmisión de los datos y una aplicación para análisis gráfico y visualización. El sistema desarrollado será instalado en una turbina WINTEC de 1,5 kW conectada en la red de distribución de la Cooperativa de Provisión y Servicios Públicos Ltda (CELAR) de la ciudad de Armstrong (Santa Fe, Argentina) en el marco del Proyecto de Redes Inteligentes con Energías Renovables (PRIER) llevado adelante por el Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES) de la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional (FRRo – UTN) [7].

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera, en la sección 2 se presentan detalles del proyecto PRIER en tanto marco en el cual se inserta el sistema propuesto en este trabajo, en la sección 3 se presenta esquemáticamente la estructura general del sistema y se detallan cada uno de sus subsistemas, en la sección 4 se describe el diseño de los ensayos de validación, mientras que en la sección 5 se presentan los resultados de dichos ensayos. Finalmente, en la sección 6 se enumeran las conclusiones del trabajo y posibles líneas de trabajo futuro.

2. EL PROYECTO PRIER

El Proyecto de Redes Inteligentes con Energías Renovables (PRIER) es un proyecto de I+D impulsado por un Consorcio Asociativo Público-Privado (CAPP) conformado por el grupo de investigación OES de la FRRo-UTN, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina y la CELAR. El mismo se viene desarrollando desde el año 2016 en la ciudad de Armstrong (Santa Fe – Argentina) y tiene como principal objetivo desarrollar una experiencia piloto de Generación Distribuida de Energías Renovables (GDER) y Red Eléctrica Inteligente. Durante la primera etapa del proyecto se realizó la instalación de una planta de generación fotovoltaica de 200 kW ubicada en el Área Industrial Armstrong (de propiedad de la cooperativa) y 50 sistemas de 1,5 kW en viviendas de usuarios de la cooperativa [7]. La planta fue puesta en marcha en 2017 y en el año 2023 la CELAR realizó una ampliación de la misma hasta llevarla a 275 kW.

Como segunda etapa del proyecto, en el año 2018, se instalaron 2 molinos eólicos de 1,5 kW marca WINTEC con inversores ABB-Wind UNO-2.0/2.5-I-OUTD-W. Estos generadores fueron montados sobre una torre de 15 m de altura en el predio de la planta de distribución de agua de la CELAR. Para monitorear parámetros relevantes en el funcionamiento de los aerogeneradores se diseñó un tablero con el equipamiento requerido para la medición y monitoreo de los mismos. En este trabajo se presenta un sistema de monitoreo de vibraciones que complementa el equipamiento actualmente existente y permitirá un análisis integral de la performance de los aerogeneradores, como así también la predicción de fallas y dar soporte para el diseño de estrategias de mantenimiento preventivo [8].

3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

En esta sección se presenta de manera esquemática el diseño del sistema de monitoreo de vibraciones propuesto. En la Figura 1 se aprecia un diagrama en bloques de esta arquitectura, donde se muestran los componentes principales y su interconexión. El sistema está compuesto por nodos sensores de vibración, un servidor central y una aplicación cliente para la visualización de los datos. Los nodos sensores transmiten sus valores y estados a través de internet al servidor central quien los reenvía a la aplicación conectada donde se realiza el procesamiento y la visualización. En la misma, se generan gráficas en el dominio del tiempo y de la frecuencia, también se pueden configurar y parametrizar diversos filtros. A su vez, se detalla una ampliación de la arquitectura con un servidor con capacidad de almacenamiento de datos como línea de trabajo futuro.

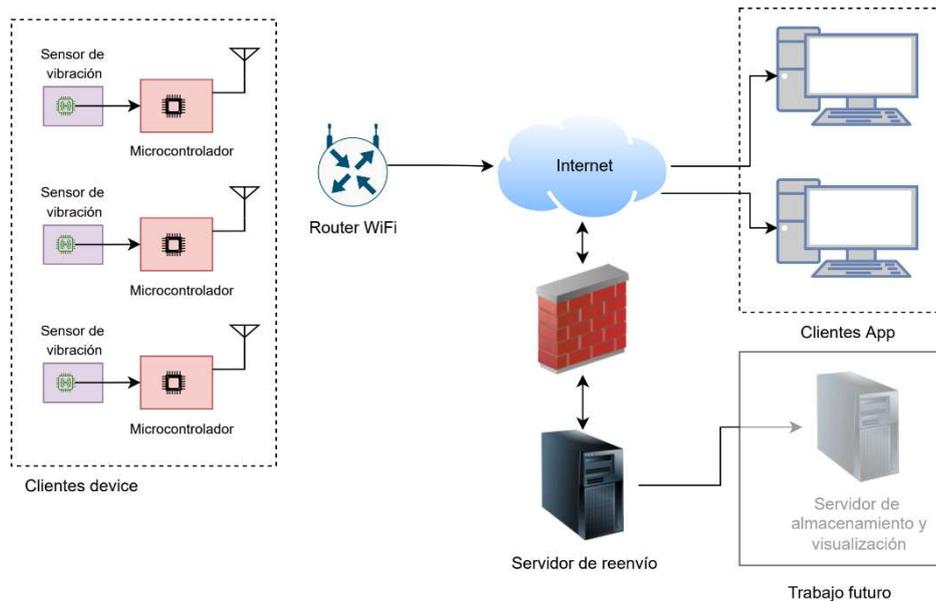


Figura 1. Estructura esquemática del sistema de monitoreo de vibraciones desarrollado.

En las siguientes secciones se detallan los subsistemas que componen el sistema propuesto: (i) Nodos sensores, (ii) Comunicación, y (iii) Aplicación de procesamiento y visualización.

3.1. DISEÑO DEL NODO SENSOR

A continuación, se detallan los aspectos más importantes del diseño del sensor: (i) el hardware, (ii) y el firmware.

3.1.1. Hardware

Los componentes más importantes involucrados en el nodo sensor son un microcontrolador y una unidad de medición inercial.

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que puede ejecutar órdenes grabadas en su memoria. Todo microcontrolador incluye en su estructura interna una unidad central de procesamiento, una memoria y algunos periféricos para su comunicación con el mundo exterior. Si bien existen en el mercado una gran variedad de microcontroladores, para su elección en una aplicación determinada se tienen en cuenta diversas características como puede ser (i) su capacidad de memoria, (ii) periféricos disponibles, (iii) velocidad de procesamiento, (iv) costo, entre otras.

En este trabajo una de las prioridades fundamentales es que el microcontrolador pueda manejar conexiones Wi-Fi sin el agregado de componentes externos. Se optó por un microcontrolador ESP8266 que reúne características de muy bajo costo y cumple con el resto de las condiciones impuestas. Se presenta en forma modular comercialmente conocido como ESP-12S, y se muestra en la Figura 2(a).

Por otro lado, una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas del inglés Inertial Measurement Unit) es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giroscopos. Las IMUs son normalmente usadas para maniobrar aviones, incluyendo vehículos aéreos no tripulados, entre muchos otros usos. En este trabajo se utilizaron los acelerómetros MPU6050 y MPU9250, que contienen todo lo necesario para realizar rastreo de movimiento de 9 ejes. Combina un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes en un mismo chip. El IMU MPU9250 es la evolución del clásico MPU6050. El MPU6050 posee una interfaz de comunicación I2C con una velocidad de transferencia de datos de 400 kHz, mientras que el MPU9250 integra una

interfaz SPI, que provee una velocidad de transferencia mucho mayor, de hasta 20 MHz. En la Figura 2(b) se muestra el módulo IMU MPU9250 utilizado.



Figura 2. (izq.) Módulo ESP-12S y microcontrolador ESP8266. (der.) Módulo IMU MPU9250.

3.2. Firmware

Para dar versatilidad al nodo sensor y que pueda ser colocado en distintas ubicaciones, se utilizó la memoria EEPROM para guardar las variables de contexto. Se crearon las funciones necesarias para la calibración del IMU y la medición de la aceleración de la vibración. También, el firmware contiene un procesador de comandos utilizado para realizar operaciones remotas. En la Figura 3 se aprecian los módulos que componen el firmware. Se distinguen dos procesos principales: la inicialización y el bucle principal.

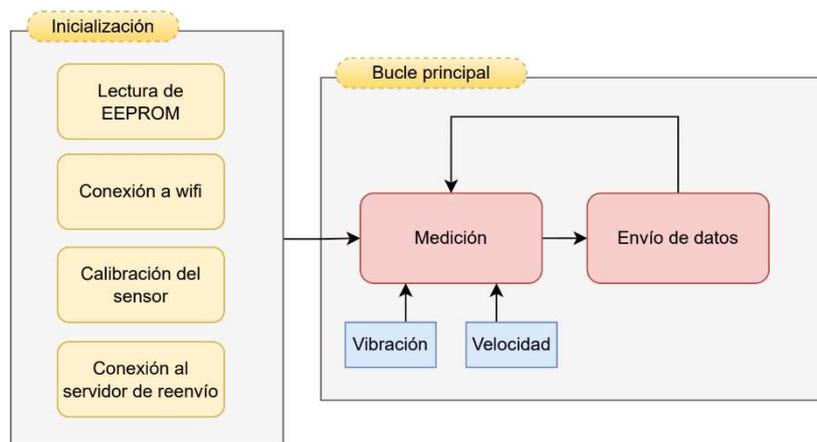


Figura 3. Estructura esquemática del firmware del nodo sensor con dos componentes principales: (i) inicialización, y (ii) bucle principal.

El proceso de inicialización se ejecuta cuando el microcontrolador se inicia o se reinicia. En este bloque se lee la memoria no volátil EEPROM del módulo y se realizan las conexiones a la red Wifi, se procede a la calibración del sensor y finalmente se conecta al servidor de reenvío.

Por otro lado, en el bucle principal se realiza la medición de los sensores de vibración y velocidad del rotor y se efectúa la transmisión de estos al servidor.

La lectura del sensor de vibración se realiza a intervalos de tiempo constante. El tiempo de muestreo, dado por la duración del intervalo en el que se toman las mediciones, no puede ser inferior al total del tiempo requerido por el proceso para la medición, procesamiento y envío de cada dato. Esta limitación en la frecuencia de muestreo determinará el máximo ancho de banda a observar en las gráficas de respuesta en frecuencia.

Por otro lado, la medición de la velocidad del rotor se realiza contando la cantidad de pulsos provenientes de un sensor del tipo infrarrojo con una rueda ranurada solidaria al eje. Para la medición, se detectan los flancos crecientes de los pulsos generados y se cuenta la cantidad de los mismos en un tiempo de un segundo. La velocidad se obtiene por la división de la cantidad de pulsos contados en un segundo dividido la cantidad de ranuras de la rueda. La Ecuación (1) muestra el cálculo de la velocidad del rotor v_r , medida en rps:

$$v_r = \frac{n_{pulsos}}{C_r} \text{ [rps]} \quad (1)$$

Donde n_{pulsos} es la cantidad de pulsos medidos en 1 segundo, y C_r es la constante de la rueda (en este caso con un valor de $C_r = 20$).

3.3. ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN

En la Figura 4 se muestra el diagrama de comunicación. La misma está basada en la utilización del protocolo MQTT. Este protocolo implementa la arquitectura publicador-suscriptor. Para ello dispone

de una aplicación intermediaria llamada *broker*. Los clientes del broker pueden ser publicadores o suscriptores. Como se aprecia en la figura, el cliente *sensor* publica datos de vibración y el cliente *aplicación* se suscribe a los mismos. De esta forma, cada vez que el sensor envíe un mensaje, este será destinado a la aplicación a través del broker.

En este protocolo es posible implementar la seguridad en el transporte de datos la cual está compuesta por encriptación, autenticación e integridad. Estas características están proporcionadas por la aplicación del protocolo TLS.



Figura 4. Diagrama de la arquitectura de comunicación

3.4. DISEÑO DE LA APLICACIÓN DE PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN

La aplicación se ha diseñado para recibir los datos de los sensores y gestionar la interfaz gráfica del usuario. En la Figura 5 se muestra un diagrama esquemático de las principales etapas involucradas.

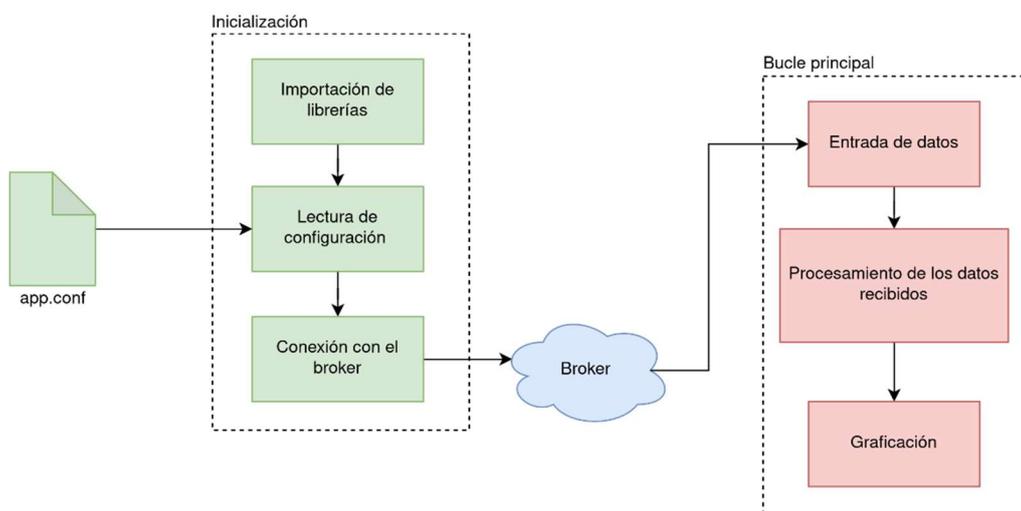


Figura 5. Diagrama etapas y funcionamiento de la aplicación de procesamiento y visualización.

En la inicialización se cargan las librerías necesarias, se toma la configuración desde un archivo externo y se realiza la conexión al broker. El archivo de configuración contiene los datos de conexión del broker (usuario, dirección IP, certificados TLS).

En el bucle principal se reciben los datos y se realiza el procesamiento de los mismos. Esto incluye la implementación de filtros y la caracterización frecuencial de la señal. El contenido frecuencial de la señal se obtendrá a partir de la Transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés de Fourier Transform) de la misma [9]. De manera simplificada, podemos decir que la FT permite representar una señal a partir de la sumatoria ponderada de señales senoidales puras. Luego, es posible obtener una gráfica de la magnitud de cada una de estas componentes individuales para cada frecuencia de un espectro de frecuencias determinado. La FT es una herramienta fundamental en la ingeniería, ya que posibilita el análisis y caracterización de señales en el espacio frecuencial pudiendo observar de manera rápida y directa fenómenos difícilmente identificables en las respuestas temporales. En el sistema propuesto se implementa un algoritmo que permite el cálculo y representación rápida de la FT conocido como FFT (por sus siglas en inglés Fast Fourier Transform). Finalmente, se procede a graficar la aceleración en el dominio del tiempo y de la frecuencia para los tres ejes espaciales. Este proceso es continuo, por lo que la gráfica se refrescará por cada recepción de datos.

4. DISEÑO DE ENSAYOS

En esta sección se describen los elementos utilizados para la realización de la validación experimental del sistema propuesto. En primer lugar, se detallan las características de un sensor de vibraciones disponible en el mercado de similares prestaciones. Luego se presenta el banco de pruebas diseñado para el montaje del sistema propuesto y la realización de los ensayos referidos

4.1. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES COMERCIALMENTE

Uno de los objetivos del presente trabajo ha sido examinar la tecnología disponible comercialmente para contar con una referencia cierta de la posibilidad de implementación de las mediciones y monitoreo buscado, y de este modo proponer una opción superadora en eficiencia y costo. En la Figura 6 se muestra el dispositivo utilizado a fines de comparación. El mismo es un sensor de vibración marca WEG modelo Motor Scan WMSC-MFM-M. Para visualizar las gráficas de este producto se utilizó la aplicación móvil provista por el fabricante.

A partir de una evaluación cualitativa de este dispositivo podemos detallar algunas ventajas y desventajas identificadas. Como puntos favorables podemos puntualizar: (i) cuenta con una aplicación móvil propia, y (ii) posee conectividad Bluetooth. En contraposición encontramos: (i) la visualización de las gráficas no es en tiempo real, (ii) al comunicación por BlueTooth no implementa capa de seguridad entre el sensor y la aplicación, (iii) solo es posible que los datos lleguen al portal web a través de la activación por medio de la aplicación móvil (este proceso es manual y lo debe hacer el usuario), y (iv) los datos generados no están en poder del usuario, sino que se alojan en un servidor del fabricante.



Figura 6. Sensor de vibración marca WEG modelo Motor Scan WMSC-MFM-M

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

Para la realización de los ensayos se construyó un sistema de prueba compuesto por un motor de corriente continua (CC) de 12 V con su driver, el sistema de monitoreo de vibraciones propuesto, y el sensor de vibraciones comercial detallado en el apartado anterior. Como se detalla en secciones previas, el mismo consta de los sensores de vibración y velocidad, y el microcontrolador que recogerá y transmitirá los datos de vibración y velocidad al servidor. En la Figura 7(izq) se muestra el banco de ensayo desarrollado. A su vez, en la Figura 7(der.) se observa un detalle de la disposición general de los sensores en el banco de ensayo. A la izquierda de la figura se puede ver la rueda ranurada montada en el rotor del motor y el sensor de velocidad asociado. A la derecha de la misma figura se aprecia el montaje del acelerómetro MPU9250 para sensar las vibraciones.

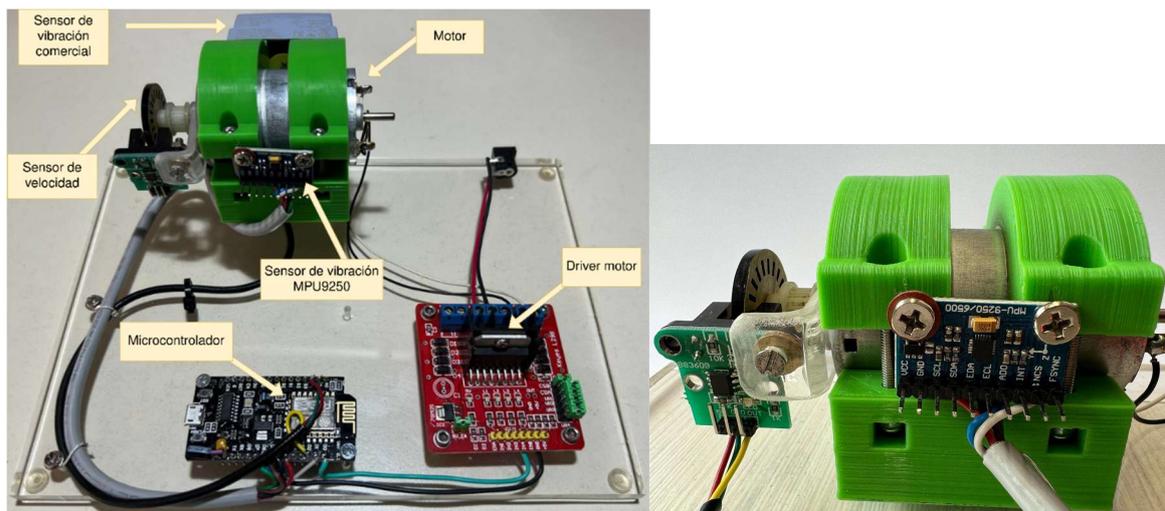


Figura 7. (izq.) Banco de ensayo del Sistema de Monitoreo de Vibraciones propuesto, (der.) Detalle de posición de sensores de vibración y velocidad sobre motor CC.

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de una serie de ensayos realizados a partir del banco de prueba detallado en la sección anterior. Se definieron distintos escenarios y condiciones de operación con el objetivo de evaluar la performance del sistema de monitoreo propuesto. En particular, se ensayaron escenarios en situación de funcionamiento normal y con desbalances en el rotor, y distintas velocidades de operación. Finalmente, se contrastaron las

mediciones obtenidas con respecto al sensor comercial. Para la evaluación se observarán las respuestas temporal y frecuencial de la aceleración del eje del rotor en alguna de las tres direcciones espaciales.

5.1. ENSAYO CON EJE BALANCEADO

En la Figura 8 se muestran los resultados para la condiciones de rotor balanceado, una velocidad de operación de 540 rpm, sin aplicación de filtrado y con un ancho de banda observable de 1000 Hz. En la Figura 9(a) se observa la aceleración en el eje x (longitudinal al eje del rotor) en función del tiempo, mientras que en la Figura 9(b) se puede ver su representación frecuencial.

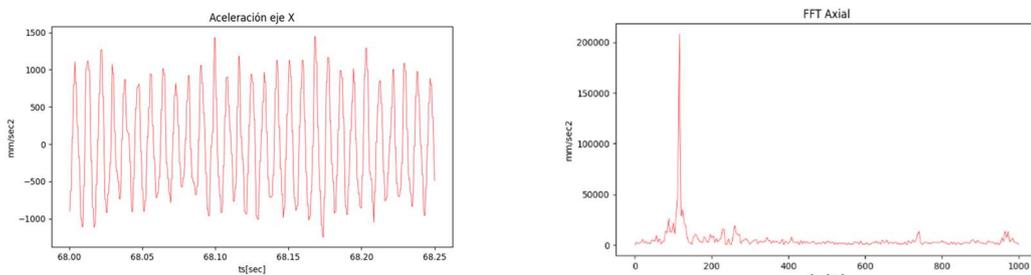


Figura 8. Ensayo rotor balanceado, velocidad 540 rpm, sin filtro: (a) aceleración eje x rotor, (b) FFT aceleración eje x.

De las gráficas podemos ver que las señales presentan un comportamiento oscilatorio relativamente constante, lo que se traduce en un contenido frecuencial acotado a determinado rango de frecuencias. Luego, un análisis detallado de las respuestas temporales y frecuencial de las señales y el estudio de su relación con condiciones de falla o presencia de vibraciones en el motor se encuentra fuera de los alcances de este trabajo

5.2. ENSAYO CON EJE DESBALANCEADO

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos de la FFT generando un desbalance en el rotor. En la Figura 9(a) se muestra la FFT de la velocidad de vibraciones en el eje y, generada por el sistema comercial detallado en la sección anterior, mientras que en la Figura 9(b) se muestra la FFT de la aceleración en el eje y, producida por el sistema propuesto para el mismo ensayo. Si bien no es posible realizar una comparación directa ya que las gráficas no corresponden a la misma variable medida, vemos ambos sistemas presentan graficas cualitativamente similares. Lamentablemente el sistema comercial no dispone de la posibilidad de exportar los datos, por lo que no es posible realizar comparaciones más precisas. Esta característica es una restricción recurrente en los sistemas comerciales de monitoreo, lo que supone un beneficio significativo del sistema propuesto.

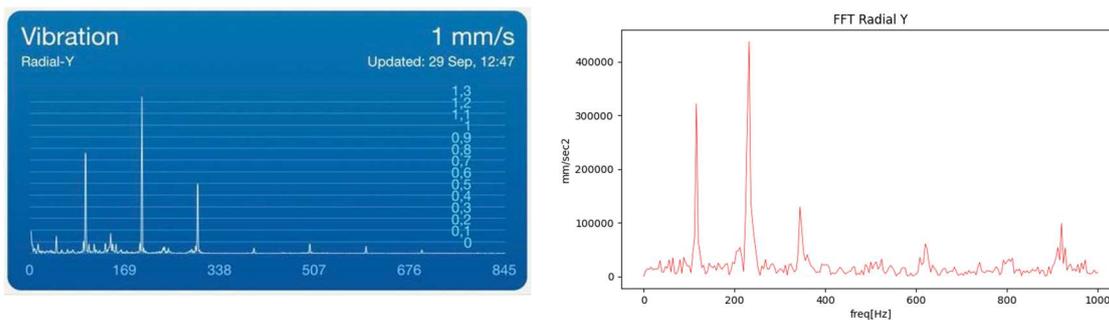


Figura 9. Ensayo rotor desbalanceado, velocidad 600 rpm, filtro 10 dB ventana Kaiser. (a) FFT sistema comercial, (b) FFT sistema propuesto.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizó el diseño completo de un sistema de monitoreo de vibraciones para turbinas eólicas de baja potencia. Este sistema abarca los dispositivos de hardware necesarios para la detección de vibraciones y velocidad, una estructura de comunicación para la transmisión de datos y una aplicación para análisis gráfico y visualización. Esta iniciativa forma parte del Proyecto de Redes Inteligentes con Energías Renovables (PRIER), dirigido por el Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES) de la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional (FRRo – UTN). Se realizaron ensayos en un sistema de prueba para validar su funcionamiento. Si bien se realizaron algunos ensayos con el objetivo de contrastar funcionamiento con respecto a sistemas comerciales, una validación exhaustiva del sistema propuesto requeriría de mayores tests. Esta etapa final se encuentra dentro de perspectivas de trabajo futuro.

REFERENCIAS

- [1] - Arraña, I., Marino, E., Bertinat, P., Salerno, J., Chemes, J., Barone, M., & Saenz, J. Estado del arte en el desarrollo de pequeños generadores eólicos. *AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE - AVERMA*, 16, (2012). 41–48.
- [2] - Quiles, E., Garcia, E., Cervera, J., & Vives, J. Development of a test bench for wind turbine condition monitoring and fault diagnosis. *IEEE Latin America Transactions*, 17(06), (2019). 907-913.
- [3] - Srinivas, K. N., & Arumugam, R. (2004). Static and dynamic vibration analyses of switched reluctance motors including bearings, housing, rotor dynamics, and applied loads. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(4), 1911-1919.
- [4] - Clementi, L. V. Cooperativismo en la transición energética experiencias pioneras y nuevos proyectos eólicos en el territorio bonaerense. *Cardinalis*, 8(14), (2020). 38–57.
- [5] - Clementi, L. V., & Jacinto, G. P. Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en argentina. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (29), (2021). 48-64.
- [6] - M. Coria, S. Buzzio, N. Moreno, M. Tielli, V. Hetze, S. Gil, J. Dagoberto y P. Rullo., Modelado de Red de Distribución y Análisis de Generación Distribuida: Resultados Preliminares en la Cooperativa Eléctrica de Ramallo, *AADECA 2023 - 28 CONGRESO ARGENTINO DE CONTROL AUTOMÁTICO*, 16 al 18 de Mayo de 2023 – Buenos Aires, Argentina. (2023).
- [7] - Garrido, S. M.. Por un futuro sustentable y una gestión democrática de la energía: la experiencia de construir un sistema de generación alternativa en la ciudad de Armstrong, Argentina. *Estudios Avanzados*, (29), (2018). 40-55.
- [8] - Peeters, C., Guillaume, P., & Helsen, J. Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy. *Renewable Energy*, 116, (2018). 74-87.
- [9] - Proakis, J.G. and Manolakis, D.G *Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, New Delhi. (1997).